

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.033

基于修正雅可比旋量模型的 C 形门机构偏差分析及优化

孔维林¹, 高彬², 马希直¹

(1. 南京航空航天大学 直升机传动技术国家级重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610073)

摘要:使用基于修正雅可比旋量模型的容差分析方法,对引导锁 C 形门机构中 C 形门的安装位置、运动精度进行分析,与 3DCS 软件结果进行对比,验证方法适用性。引用机器人运动学相关理论,将静态容差分析拓展到动态容差分析,对 C 形门在运动过程中的位置精度进行分析,使用基于 Taguchi 的容差贡献度、灵敏度对其进行优化分析及容差设计,得出影响较大的因子。

关键词:飞机;修正雅可比旋量模型;引导锁 C 形门机构;容差设计;3DCS;Taguchi

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0173-04

Deviation Analysis and Optimization of C-shaped Latch Mechanism Based on Modified Jacobian Screw Model

KONG Weilin¹, GAO Bin², MA Xizhi¹

(1. National Key Laboratory of Helicopter Transmission Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China; 2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073, China)

Abstract:By the tolerance analysis method based on the modified Jacobian screw model, analyzes the installation position and motion accuracy of the C-shaped latch in the C-shaped latch mechanism of the guide lock, compares their results with the ones by 3DCS software to verify the applicability of the method. The kinematics theory of the robot is applied to extend the static tolerance analysis to the dynamic tolerance analysis, the position accuracy of the C-shaped latch in the process of motion is analyzed, and the Taguchi based tolerance contribution degree and sensitivity are used to optimize the analysis and tolerance design, obtaining the factors with greater influence.

Keywords:aircraft; modified Jacobian spinor model; guide lock C-bolt mechanism; tolerance design; 3DCS; Taguchi

0 引言

近年来,客运市场增长趋缓,货运市场飞速发展,航空货运不断提高货机运输能力,而客改货飞机的费用比购置全新货机要低得多,这样还可以大大减少货运公司的初期投入。而飞机制造准确度问题涉及设计和制造的各个方面,过去多凭经验处理,存在的问题很多。目前,大部分飞机容差设计依然采用传统方法。传统容差分析是以一维尺寸链为基础,将尺寸链进行泰勒级数展开,从而推导出容差分析模型。这种方法主要适用于静态容差分析。近年来国内外在容差领域取得了一定的成果。LAPERRIERE 等^[1]提出了一种计算机辅助公差模型——雅可比旋量模型,该方法结合了为计算机辅助公差设计开发的雅可比矩阵和旋量模型的优点,能够在统计情况下进行公差分析和公差综合。DU 等^[2]通过建立轨迹修正的单层

优化模型和一种新的嵌套双层优化模型,完成了舱门机构的尺寸公差设计,有效提高了舱门机构目标点实际运行轨迹的精度。葛磊等^[3]通过建立容差仿真分析模型,借用 VSA 容差分析软件,分析同类零件在不同定位装配方式时零件制造误差对装配控制目标的影响,得到公差库文件,为工艺优化提供依据。陈华^[4]将雅可比旋量模型引入到发动机装配体的公差分析中,建立特征旋量在组合公差限制下的矢量变动及其相互间的约束方程,最终实现了对发动机装配体准确可靠的三维公差分析。仇念尧^[5]对考虑了孔销浮动的汽车座椅升降机构以及滑轨总成进行容差分析,并引入多种成本模型,建立了多目标公差优化模型,从而实现了综合考虑功能性和成本的汽车座椅骨架系统的容差设计。张晓丹^[6]以地铁扶手机构为例,将 Taguchi 方法应用到地铁扶手机构的稳健优化中,同时建立两种以成本-公差函数为目标的公差

第一作者简介:孔维林(1998—),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为机械工程,1627954723@qq.com。

稳健优化模型,使用遗传算法进行求解,将计算结果进行对比,发现基于质量损失模型的公差稳健设计更加有效。

本文使用基于修正雅可比旋量模型^[7]的容差分析方法,对引导锁C形门机构中C形门的安装位置、精度进行分析。在飞机使用过程中,C形门的安装位置以及运动过程中位置的偏差都会给是否能正确上锁产生影响,因此这里主要研究C形门在运动过程中的位置偏差。第1节主要说明基于修正雅可比旋量模型的C形门机构容差模型建立过程及各机构杆件参数。第2节说明具体容差累积函数的求解方法及容差设计。

1 C形门机构容差模型建立

文献[8]中写道,某机构运动链即为其围绕功能要求部位的容差链,但是在较为复杂的机构中,单一的运动链是没有办法兼顾容差累积方向和容差变动方向,所以需要容差链进行分析。 $\{(FE_1, FE_2, \dots, FE_n) : FR\}$ 可以用来表示某一装配链,其中 $FE_1, FE_2, \dots, FE_n$ 可以看成是功能元素对,FR看成是功能要求部位,那么容差链就是这一装配链。

容差链建立的具体过程就是在容差链上的每个功能元素对内建立局部方向坐标系(在功能元素对和功能要求部位之间建立联系,方向上是与全局坐标系保持一致,用来表示容差变动影响)和容差坐标系(建立小位移旋量模型的坐标系,用来表示容差变动方向),解决单一运动链无法解决的问题,同时在功能要求部位建立全局坐标系。

以一个曲柄滑块机构为例,功能元素对应容差坐标系及局部方向坐标系,功能要求部位的全局坐标系建立如图1所示。

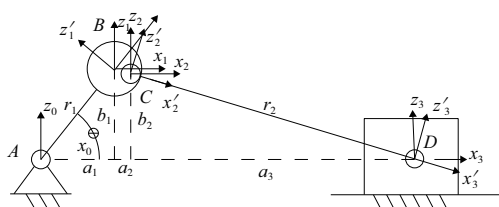


图1 各坐标系建立示意图

图1为曲柄滑块机构的机构运动简图,运动副B处存在间隙容差,D处位置精度就是分析的目标。容差链为AB—BC—CD—D,在A处建立全局坐标系,在B、C、D处建立容差坐标系和局部方向坐标系,从而完成容差表达和容差传递的目标。

在容差坐标内建立的小位移旋量模型需要转换到局部方向坐标系内,而 $g_{ab} = (p_{ab}, R_{ab})$ 可用于表示两个坐标系之间的转换,其中 p_{ab} 为坐标系的原点在另一个坐标系的位置向量, R_{ab} 为坐标系相对于另一个坐标系的方向矩阵。而对于旋量来说,其坐标系之间的转换,就要求解 g_{ab} 的伴随矩阵 $A_{g,ab}$ 。

$$A_{g,ab} = \begin{bmatrix} R & p \times R \\ 0 & R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \hat{p}R \\ 0 & R \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于所有的功能元素对,因为其中所建立的两坐标系的原点位置保持不变,所以 $\hat{p} = 0$ 。则某小位移旋量模型的转换过程可以用公式表示为

$$\begin{bmatrix} \delta l \\ \delta \alpha \end{bmatrix}_{FE_i} = \begin{bmatrix} R & \hat{p}R \\ 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{i1} \\ \delta_{i2} \\ \delta_{i3} \\ \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \phi_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{i1} \\ \delta_{i2} \\ \delta_{i3} \\ \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \phi_{i3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

局部方向坐标系建立在每一个功能元素对处,同时也解决了功能元素对内6个虚拟节点的方向在全局坐标系内各不相同的问题。因此,可以用齐次坐标系表示第*i*个局部方向坐标系在全局方向坐标系下的位置和方向:

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{ix} \\ 0 & 1 & 0 & d_{iy} \\ 0 & 0 & 1 & d_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为局部方向坐标系的方向; $\begin{bmatrix} d_{ix} \\ d_{iy} \\ d_{iz} \end{bmatrix}$ 为

局部方向坐标系原点在全局坐标系下的位置。

对于第*i*个功能元素对的雅可比矩阵,主要是通过各功能元素对内局部方向坐标系在全局坐标系内的位置和方向确定的,具体为

$$\begin{aligned} J_{i1} &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix}; J_{i2} = \begin{bmatrix} y \\ z \\ 0 \end{bmatrix}; J_{i3} = \begin{bmatrix} z \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \\ J'_{i4} &= \begin{bmatrix} x \times (d_0^n - d_0^i) \\ x \end{bmatrix}; J'_{i5} = \begin{bmatrix} y \times (d_0^n - d_0^i) \\ y \end{bmatrix}; \\ J'_{i6} &= \begin{bmatrix} z \times (d_0^n - d_0^i) \\ z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

同时,在机构运动的过程中, $(d_0^n - d_0^i)$ 是一直

在变化的,这样构建的雅可比矩阵也会发生变化。假设输入量为 θ ,则 $(d_0^n - d_0^i) = f_i(\theta)$,进而需要将雅可比矩阵内关于转动节点的推导进行修正。

$$J_{i4} = \begin{bmatrix} x f_i(\theta) \\ x \end{bmatrix}; J_{i5} = \begin{bmatrix} y f_i(\theta) \\ y \end{bmatrix}; J_{i6} = \begin{bmatrix} z f_i(\theta) \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

那么对于含有 n 个功能元素对的容差链,其全局容差累积函数为

$$[\delta l \quad \delta \alpha]^T = \{ [J_{11} J_{12} J_{13} \cdots J_{16}]_{FE_1} \cdots [J_{n1} J_{n2} J_{n3} \cdots J_{n6}]_{FE_n} \} [\delta_{FE_1} \cdots \delta_{FE_n}]^T = J_\eta [\delta_{FE_1} \cdots \delta_{FE_n}]^T \quad (6)$$

式中: $[\delta l \quad \delta \alpha]^T$ 为功能要求部位的小位移旋量,也就是所求的结果; J_η 为全局雅可比矩阵; $[\delta_{FE_1} \cdots \delta_{FE_n}]^T$ 为局部方向坐标系上的小位移旋量。推导出容差累积函数后,还需要进行灵敏度分析,可以使用基于 Taguchi 的容差贡献度、灵敏度方法。

Taguchi 方法中引入了二次质量损失函数,其预期值表达式为

$$Q = E(L(f)) = k[\sigma^2 + (\mu - m)^2] \quad (7)$$

式中: $L(f)$ 为质量损失函数; f 为响应函数; k 为一常数; μ 、 σ 分别为 f 的均值和方差; m 为目标值。对于式(7),若存在可以将 μ 调整到目标值的比例因子,则式(7)可以推导为

$$\eta = 10 \log_{10}(\mu^2 / \sigma^2) \quad (8)$$

式(8)为推导出的信噪比公式,而对于不同的设计目标,对信噪比的要求也不一样,想得到最小的目标值,那么信噪比应取最大,则此时信噪比表达式转化为

$$\eta = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (9)$$

为进一步研究各容差的灵敏度问题,需要对式(6)进行细化,得到通用容差累积关系式。

$$\delta_a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^6 J_{ijk} \delta_{ij} \quad (k=1, \cdots, 6, j=1, \cdots, 6) \quad (10)$$

在稳健设计中,可以对 δ_{ij} 的范围取不同的水平值来进行正交试验,对其进行信噪比分析,降低噪声因子的影响。从机构位置偏差角度来说,机构位置偏差应越小越好,所以目标值越小,则位置偏差的信噪比公式采用式(9)。通过对信噪比及其极差的分析,得到对偏差影响较大的因子,从而重新进行容差设计,使得偏差趋于稳定。

图2为C形门机构的机构运动简图,这里只建立了部分坐标系,具体坐标系建立过程参照

图1,运动副 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 处均存在间隙容差, G 处位置精度就是此次分析的目标,并且做出以下假设:在运动副中,不存在因接触碰撞而引起的变形并且全部为线接触。分析整个机构可得,两个四杆机构都与C形门的位置精度有关,研究讨论各组件容差及间隙容差对其位置精度的影响。

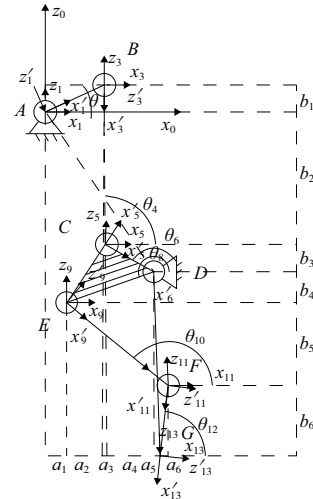


图2 C形门机构运动简图

本节对于孔轴配合选用 H8/f7, 尺寸长度公差采用 6 级公差,其中机构各杆件参数、公差以及容差设计值如表 1 所示,尺寸、间隙容差均为不合格率为 0.27% 的正态分布。

表1 机构各杆件参数、公差信息

名称	尺寸及公差/mm	容差	数值/mm
AB	46±0.008 0	Δ_{AB}	(0, 0.002 67 ²)
BC	117±0.011 0	Δ_{BC}	(0, 0.003 67 ²)
CD	40±0.008 0	Δ_{CD}	(0, 0.002 67 ²)
DE	68±0.009 5	Δ_{DE}	(0, 0.003 17 ²)
EF	95±0.011 0	Δ_{EF}	(0, 0.003 67 ²)
FG	52±0.009 5	Δ_{FG}	(0, 0.003 17 ²)
A	$\phi 40_0^{+0.039} / \phi 40_{-0.050}^{-0.025}$	$\Delta_{r_{eA}}$	(0.028 50, 0.005 32)
B	$\phi 10_0^{+0.022} / \phi 10_{-0.028}^{-0.013}$	$\Delta_{r_{eB}}$	(0.015 75, 0.003 12)
C	$\phi 10_0^{+0.022} / \phi 10_{-0.028}^{-0.013}$	$\Delta_{r_{eC}}$	(0.015 75, 0.003 12)
D	$\phi 10_0^{+0.022} / \phi 10_{-0.028}^{-0.013}$	$\Delta_{r_{eD}}$	(0.015 75, 0.003 12)
E	$\phi 10_0^{+0.022} / \phi 10_{-0.028}^{-0.013}$	$\Delta_{r_{eE}}$	(0.015 75, 0.003 12)
F	$\phi 10_0^{+0.022} / \phi 10_{-0.028}^{-0.013}$	$\Delta_{r_{eF}}$	(0.015 75, 0.003 12)
G	$\phi 44_0^{+0.039} / \phi 44_{-0.050}^{-0.025}$	$\Delta_{r_{eG}}$	(0.028 50, 0.005 32)

2 C形门机构容差模型求解及优化

使用所介绍的修正雅可比旋量模型对C形门机构进行容差分析,建立容差链为 $AB-BC-CD-DE-EF-FG$,确认容差链中各功能元素对和功能要求部位,并在相应位置建立容差坐标系、局部方向坐标系、全局方向坐标系。功能要求部位的位置偏差只考虑 x 和 z 方向,对两个方向的数据进行平方和及再开根的处理,得到容差累积函数为:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \Delta r_{eA} \cdot \cos\theta + \Delta_{AB} \cdot \cos\theta + \Delta r_{eB} \cdot \cos(\pi - \theta_4) + \\ &\Delta_{BC} \cdot \cos(\pi - \theta_4) + \Delta r_{eC} \cdot \cos(\pi - \theta_6) + \\ &\Delta_{CD} \cdot \cos(\pi - \theta_6) + \Delta_{DE} \cdot \cos\theta_8 + \\ &\Delta r_{eE} \cdot \cos(\pi - \theta_{10}) + \Delta_{EF} \cdot \cos(\pi - \theta_{10}) + \\ &\Delta r_{eF} \cdot \cos(\pi - \theta_{12}) + \Delta_{FG} \cdot \cos(\pi - \theta_{12}) \\ \delta_3 &= \Delta r_{eA} \cdot \sin\theta + \Delta_{AB} \cdot \sin\theta - \Delta r_{eB} \cdot \sin(\pi - \theta_4) - \\ &\Delta_{BC} \cdot \sin(\pi - \theta_4) - \Delta r_{eC} \cdot \sin(\pi - \theta_6) - \\ &\Delta_{CD} \cdot \sin(\pi - \theta_6) + \Delta_{DE} \cdot \sin\theta_8 - \\ &\Delta r_{eE} \cdot \sin(\pi - \theta_{10}) - \Delta_{EF} \cdot \sin(\pi - \theta_{10}) - \\ &\Delta r_{eF} \cdot \sin(\pi - \theta_{12}) - \Delta_{FG} \cdot \sin(\pi - \theta_{12}) \\ w &= \sqrt{\delta_1^2 + \delta_3^2} \end{aligned} \quad (11)$$

考虑到引导锁C形门机构的作动器行程为 120° ,那么输入变量 θ 从 25° 变化到 -95° ,每隔 1° 进行一次计算。运用蒙特卡洛法,采用数值模拟的方式抽取随机数,同时按照正态分布规律,抽取随机数的不合格率设置为 0.27% ,得到各角度的平均偏差量,并将该机构模型导入3DCS中进行仿真,按照蒙特卡洛抽样的方式进行抽样装配并得出结果,将其与基于修正雅可比旋量模型得出的平均偏差数据进行对比,结果如图3所示。

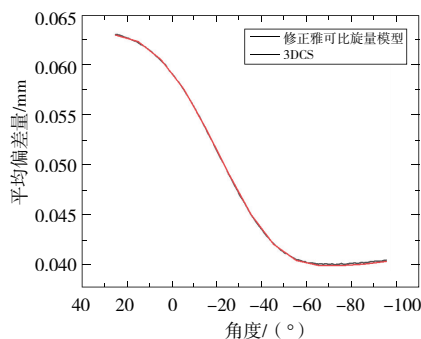


图3 平均偏差量对比

由图3可得,在机构运动过程中,其平均偏差量随着输入角度的变化会有不同程度的波动,在

前一段行程中,平均偏差量不断减小,但是在后一段中,有慢慢变大的倾向,可以适当减小运动过程中的偏差,提高运动精度。修正雅可比旋量模型和商业容差软件所得曲线以及变化趋势基本相同,虽然有点偏差,但误差较小,且在可接受范围之内。因此该方法可用于分析此机构。

对得到的容差累积函数进行灵敏度分析,将优化前后的平均偏差量进行对比,结果如图4所示。

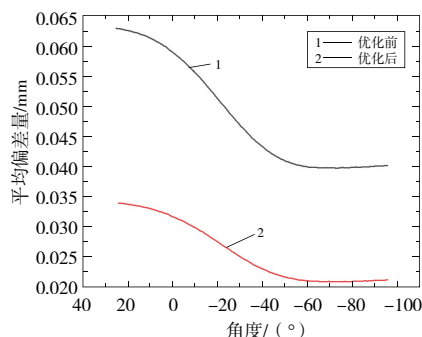


图4 优化前后的平均偏差量

从图4可知,使用基于Taguchi的容差贡献度、灵敏度分析方法,对各杆件容差重新设计以后,目标的平均偏差减小约 50% ,同时在机构运动过程中波动明显变小,稳定性提高。在推导出容差累积函数的前提下,使用基于Taguchi的容差贡献度、灵敏度分析方法可以很好地改善初始容差不足导致的偏差过大的情况。

3 结语

1)使用修正雅可比旋量模型进行容差分析,该方法同样适用于空间机构,将计算结果与基于一维尺寸链理论的商业容差分析软件进行对比,两者所得曲线以及变化趋势基本相同,误差较小,且在可接受范围之内。因此该方法可用于分析此机构。

2)以基于修正雅可比旋量模型的容差分析方法为前提,为后面对机构各容差进行灵敏度分析创造了条件,尤其是对运动副间隙容差。

3)采用基于Taguchi的容差贡献度、灵敏度分析方法对C形门机构分析及容差设计,优化效果明显,有效地提高C形门机构的装配精度和运动稳健性,目标的平均偏差减小了约 50% ,稳定性提高。

(下转第244页)

值如表 1 所示。可以看出在各测量平面,经过两步校准,误差指数最大值和平均值都得到了大幅降低,这也证明了所提出的两步校准方法的有效性。

表 1 校准前后误差指标的最大值和平均值

测量面 z/mm	最大值/ μm			平均值/ μm		
	粗校 准前	粗校 准后	精校 准后	粗校 准前	粗校 准后	精校 准后
200	73.34	55.19	21.20	24.48	21.93	8.48
220	194.39	61.24	17.23	148.01	27.16	7.00
240	304.18	52.62	17.67	274.38	23.92	6.80

3 结语

本研究提出了一种基于最小误差模型的并联机械手运动学校准方法。首先基于并联机械手臂结构特性和各关节相应的坐标系,提出了一种由 0 偏移量粗识别和几何源误差精识别组成的分层识别策略,从而实现并联机械手的精度校准。最后通过校准实验测试表明,所提出的校准方法能够大幅降低并联机械手的终端误差,验证了所提校准方法的有效性。该校准方法也适用于其他类型并联机械手的精度校准,具有一定的普适性。

参考文献:

- [1] 朱大虎,徐小虎,蒋诚,等. 复杂叶片机器人磨抛加工工艺技术研究进展[J]. 航空学报,2021,42(10): 8-30.

(上接第 176 页)

参考文献:

- [1] LAPERRIERE L, GHIE W, DESROCHERS A. Statistical and deterministic tolerance analysis and synthesis using a unified Jacobian-torsor model[J]. CIRP Annals, 2002, 51(1): 417-420.
- [2] DU J B, HUANG Z T, YANG R Z. Optimization of the motion control mechanism of the hatch door of airliner[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51(5): 1173-1186.
- [3] 葛磊,陈双霖. 基于装配关系的公差库建立及在容差分析中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(5): 67-70.
- [4] 陈华. 基于雅克比旋量模型的三维公差分析方法研究及在发动机装配中的应用[D]. 上海:上海交通大学

- [2] 吴锦辉,陶友瑞. 工业机器人定位精度可靠性研究现状综述[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18): 2180-2188.
- [3] YANG L W, TIAN X Z, LI Z L, et al. Numerical simulation of calibration algorithm based on inverse kinematics of the parallel mechanism[J]. Optik, 2019, 182: 555-564.
- [4] ROSYID A, EL - KHASAWNEH B, ALAZZAM A. External kinematic calibration of hybrid kinematics machine utilizing lower-DOF planar parallel kinematics mechanisms [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(6): 995-1015.
- [5] 周星,黄石峰,朱志红. 六关节工业机器人 TCP 标定模型研究与算法改进[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 186-196.
- [6] 王宪伦,胡晓伟. 基于多孔标定法的串联机器人运动学标定研究[J]. 机电工程, 2019, 36(5): 470-474, 500.
- [7] 朱衡,杨东超,常旭,等. 利用粒子群优化方法标定机械臂关节参数[J]. 机械设计与制造, 2021, 365(7): 285-290.
- [8] 陈爽,张桥. 基于 PSO 算法的工业机器人绝对距离自标定方法[J]. 制造业自动化, 2021, 43(4): 30-34.
- [9] 王远东,高洁. 3-R2U2S 并联机器人的机构参数标定法探究[J]. 机械传动, 2020, 44(5): 121-125.
- [10] 张旭祥,沈丹峰,刘夏轩德,等. 含关节间隙的并联机器人运动误差分析[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(1): 91-97.

收稿日期:2023-01-31

学, 2015.

- [5] 仇念尧. 汽车座椅骨架系统功能公差研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [6] 张晓丹. 地铁扶手的稳健优化设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- [7] 张黎. 面向机构精度稳健性的起落架容差设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [8] LAFOND P, LAPERRIERE L. Jacobian-based modeling of dispersions affecting pre-defined functional requirements of mechanical assemblies [C]// Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP'99) (Cat. No. 99TH8470). Porto, Portugal: IEEE, 2002: 20-25.

收稿日期:2022-12-05